

PATENT OFFICE JAPANESE GOVERNMENT

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this office.

Date of Application: September 17, 2003

Application Number: 2003-323841

Applicant(s): SHOWA OPTRONICS CO., LTD.

(SEAL)

October 3, 2003

Commissioner, Japan Patent Office: Yasuo IMAI

No. 2003-3081937

2003-323841

[Document]	Patent Application
[Docket Number]	12059
[Filing Date]	September 17, 2003
[Recipient]	Patent Office Administrator
[IPC]	H01S 3/00 H01S 3/05 H01S 3/06 H01S 3/11 G02F 1/37
[Inventor]	
[Address]	c/o SHOWA OPTRONICS CO., LTD., 22-1, Hakusan 1-chome, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, Japan
[Name]	Minoru KADOYA
[Applicant]	
[Identification Number]	592163734
[Address]	5-3, Shinmachi 3-chome, Setagaya-ku, Tokyo, Japan
[Name]	SHOWA OPTRONICS CO., LTD.
[Attorney]	
[Identification Number]	100089266
[Patent Attorney]	
[Name]	Yoichi OSHIMA
[Official Fee]	
[Deposit Number]	047902
[Paid Amount]	¥21,000
[List of Attached Documents]	
[Document]	Claims 1
[Document]	Specification 1
[Document]	Drawing 1
[Document]	Abstract of Disclosure 1
[General Power of Attorney Number]	9708708

日本国特許庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日  
Date of Application: 2003年 9月17日

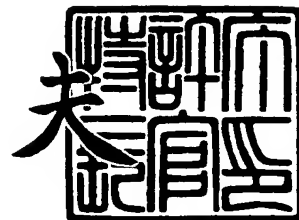
出願番号  
Application Number: 特願2003-323841  
[ST. 10/C]: [JP2003-323841]

出願人  
Applicant(s): 昭和オプトロニクス株式会社

2003年10月 3日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今井康夫



出証番号 出証特2003-3081937

【書類名】 特許願  
【整理番号】 12059  
【提出日】 平成15年 9月17日  
【あて先】 特許庁長官殿  
【国際特許分類】 H01S 3/00  
H01S 3/05  
H01S 3/06  
H01S 3/11  
G02F 1/37

【発明者】  
【住所又は居所】 神奈川県横浜市緑区白山1丁目22番1号  
昭和オプトロニクス株式会社横浜事業所内  
【氏名】 角谷 実

【特許出願人】  
【識別番号】 592163734  
【住所又は居所】 東京都世田谷区新町3丁目5番3号  
【氏名又は名称】 昭和オプトロニクス株式会社

【代理人】  
【識別番号】 100089266  
【弁理士】  
【氏名又は名称】 大島 陽一

【手数料の表示】  
【予納台帳番号】 047902  
【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】  
【物件名】 特許請求の範囲 1  
【物件名】 明細書 1  
【物件名】 図面 1  
【物件名】 要約書 1  
【包括委任状番号】 9708708

**【書類名】 特許請求の範囲****【請求項 1】**

出力鏡と少なくとも 1 枚の反射鏡の間でレーザ共振器を構成し、前記レーザ共振器に少なくとも希土類イオンを添加したレーザ結晶を配置し、さらに前記レーザ共振器の外部に配置された半導体レーザと、この半導体レーザの出力光を集光するための励光学系を配置し、前記レーザ共振器の光軸と同軸上に沿って出てくる前記半導体レーザの出力光で前記レーザ結晶を励起する半導体レーザ励起固体レーザにおいて、

前記レーザ結晶として、希土類イオン濃度が異なるだけで同じ組成式をした複数のレーザ結晶素子を、励起光が入射する側から希土類イオン濃度の低い順に並べて配置すると共に、前記レーザ結晶のレーザが通過する面を除く側面に放熱手段を設け、レーザが通過する面と直交する外側へ放熱させることを特徴とした半導体レーザ励起固体レーザ。

**【請求項 2】**

前記レーザ結晶は、各レーザ結晶素子を密着状態で配置した請求項 1 に記載した半導体レーザ励起固体レーザ。

**【請求項 3】**

前記レーザ結晶は、各レーザ結晶素子を一体に接合して複合化結晶にした請求項 1 に記載した半導体レーザ励起固体レーザ。

**【請求項 4】**

前記レーザ結晶は、各レーザ結晶素子を間隔をあけた近接状態で配置すると共に、この間隔は最も厚さの小さいレーザ結晶素子に比べて十分に小さく設定した請求項 1 に記載した半導体レーザ励起固体レーザ。

**【請求項 5】**

前記放熱手段は、レーザ結晶の側面を保持するヒートシンクである請求項 1 ～ 4 のいずれかに記載した半導体レーザ励起固体レーザ。

【書類名】明細書

【発明の名称】半導体レーザー励起固体レーザー

【技術分野】

【0001】

本発明は、軸励起方式あるいは端面励起方式と呼ばれる半導体レーザー励起固体レーザーに関するものであって、特に強い励起光でもレーザー結晶が破壊しないようにして、レーザーの出力を向上することを主たる目的とする。

【背景技術】

【0002】

希土類イオンを添加したレーザー結晶を半導体レーザーで励起する半導体レーザー励起固体レーザーのうち、軸励起あるいは端面励起と呼ばれる励起方式による半導体レーザー励起固体レーザーは、励起光とレーザー発振光のモードマッチングがとり易いので、側面励起方式に比べて励起光から出力光への高い変換効率を実現できると共に、高い変換効率を維持しながら空間モードをTEM<sub>00</sub>にすることも比較的容易に実現でき、また変換効率が高いので同じ出力を得る場合に、側面励起方式に比べて小さい出力の半導体レーザーで良いので、製造コストを低く押さえられる方式である。

【0003】

この端面励起方式による具体例としては、例えば励起用の半導体レーザーとして発光領域の寸法が10mm×1μm程度のものを使用し、出力が40W程度のものが現存しており、この半導体レーザーの出力光を例えば、特許文献1の「レーザービームの補正方法及び装置」によって600μm×600μm程度の正方形の形状に集光し、特許文献2の「Laser beam shaping system」と同様に集光した半導体レーザー光でレーザー結晶を励起することができる。

【0004】

また、レーザー結晶としてNd<sup>3+</sup>濃度が0.5原子%のネオジウム添加バナジン酸イトリウムNd:YVO<sub>4</sub>結晶を励起し、波長1064nmのレーザー光を発生させるが、レーザー結晶の大きさが通常は3mm×3mm×5mmであり、5mmの方向にレーザー光が伝搬するように配置しているが、この半導体レーザー励起固体レーザーでは、半導体レーザーの出力が20Wのときに、波長1064nm出力光のパワーは約9Wの出力が得られる。

【0005】

さらに、レーザー共振器内に音響光学効果を利用したQスイッチを配置し、半導体レーザーを出力20Wの連続動作のままQスイッチを20kHzの周波数で動作させて、繰り返しレーザーパルスを発生させた場合には平均パワーとして8Wが得られ、また共振器内に第2高調波発生のための非線形光学結晶を配置すると共に、出力鏡をNd:YVO<sub>4</sub>の発振波長に対して反射率を高くし、その第2高調波に対して反射率が小さくなるものに替えた内部共振器型第2高調波発生レーザーの場合には、波長532nmのレーザー光が最大6Wまで得られている。

【特許文献1】特許第3098200号公報

【特許文献2】米国特許第5,805,748号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、従来の軸励起あるいは端面励起と呼ばれる励起方式の半導体レーザー励起固体レーザーの場合には、半導体レーザー励起固体レーザーの出力を上げるために、励起に使用する半導体レーザーの出力を上げていくと、励起光によってレーザー結晶の入射側が破壊されてしまう恐れがあると共に、レーザー結晶の励起光が照射されている部分と照射されていない部分とでは、温度上昇の量及び熱膨張の量が異なることに起因して構造的な歪が生じ、レーザー結晶を破壊させる。

【0007】

すなわち、励起光がレーザー結晶に入射すると、レーザー結晶内を伝搬する励起光のパワー

が指数関数的に減少していくという性質があるために、励起光はレーザ結晶の励起光の入射する側で大部分が吸収され、この吸収によってレーザ結晶は励起光の入射する側が最も破壊され易くなるので、半導体レーザ励起固体レーザを正常に動作させるためには、レーザ結晶が破壊されないように半導体レーザの出力を制限する必要がある、この制限によってレーザ出力の上限が決まっていた。

#### 【0008】

前記した従来技術の具体例で示したレーザでは、レーザ結晶の長さが5mmもあるのに、励起光が入射する側の0.5mm程度の厚さの部分で励起光の約1/2が吸収されてしまうので、半導体レーザの出力を25～30Wまで上げていくと、レーザ結晶の励起光入射側が破損し、この破損するしきい値は、ポンプ光の僅かなビーム径の違いや、半導体レーザの発振波長の違いあるいは、レーザ結晶自体の品質や研磨の仕上げ状態の違いなどによって異なるが、実用上では半導体レーザの出力を20Wに制限して使用している。

#### 【0009】

またレーザ結晶の破損を防ぐ方法として、レーザ結晶に添加する希土類イオンの濃度を低下させ、励起側端面の吸収光の量を低くすることも行われているが、希土類イオンの濃度を低くした場合には、所望のレーザ出力が得られるようにレーザ結晶の長さを伸ばす必要があるので、高出力の半導体レーザを励起源に使用する際には出力光をビーム整形しても、細いビーム径を維持したままレーザ結晶内を伝搬させることが難しく、結晶を通過する前にビーム径が大きくなってしまう。

#### 【0010】

そのために、固体レーザの発振がより高次の横モードで発振してビーム品質が低下したり、励起密度が下がってしまうので、期待するほど効率が上がらないという問題があると共に、特に吸収係数が大きい場合には、励起波長に対する許容度が広いNd:YVO<sub>4</sub>などのレーザ結晶を用いても、希土類イオンの濃度を低下させることによって、レーザ出力が半導体レーザの波長に対して敏感に変化してしまうという問題もある。

#### 【0011】

なお、端面励起あるいは軸励起の励起方式とは異なるが、特許文献3のように強い励起でもレーザ結晶が破壊しないようにするために、薄い板状のレーザ結晶の一方の端面を金属製のヒートシンクに取り付けて冷却すると共に、冷却側の端面をレーザ発振光や励起光に対する反射面とし、レーザ結晶に添加する希土類イオンの濃度を冷却面となる端面に向かって連続的または段階的に増加させ、冷却側の端面の反対側から励起する提案もあり、この濃度分布によって冷却面に近い側での発熱を多くし冷却効率を上げているが、励起光とレーザ発振光の光軸を同軸にできないので調整が難しいこと、量産性に難点がある構造であることなどの問題点があった。

【特許文献3】特許第3266071号公報

#### 【0012】

そこで本発明では、これら従来技術の課題を解決し得る半導体レーザ励起固体レーザを提供するものであって、端面励起あるいは軸励起と呼ばれる励起方式をとる半導体レーザ励起固体レーザにおいて、強い励起光でもレーザ結晶が破壊しないように励起による発熱を平均化すると共に、発熱を効果的に放熱してレーザ出力を増加させることを主たる目的とするものである。

【課題を解決するための手段】

#### 【0013】

本発明を具現化する際に、本件発明者らは次のような検討を行っており、高強度の励起によってレーザ結晶の破壊がおこる根本的な原因は、励起光がレーザ結晶に入射する側の面に近い部分で大部分が吸収されることであるが、レーザ結晶の反対側では励起光の吸収量が少ないので、破壊に至るまでにはまだ余裕があることから、レーザ結晶の励起光入射端での吸収量を減らすと共に、レーザ結晶の反対側では通常より多く励起光を吸収させ、単位長さあたりの吸収量をなるべく平均化して発熱する箇所を光軸方向に分散させ、またレーザ結晶を側面から外側に放熱して冷却することにより、短い結晶長でもレーザ結晶の

破壊がおきない状態で励起光のパワーを上げられると考えた。

#### 【0014】

この励起光の吸収について、図6～8に基づいて説明すると、図6(a)は伝搬方向 $z$ に対する単位長さあたりの吸収量 $dP(z)/dz$ を示すものであって、最も理想的な伝搬方向の位置によらず一定である状態を示しているが、この単位長さあたりの励起光吸収量は、レーザ結晶の破壊の起こらない値に設定する必要があるため、励起光吸収量の分布を伝搬方向について一定にするためには、図6(b)のように $z$ が大きくなるにつれて一定の勾配で減少することが望ましく、図では1.25mmだけ通過したところでのパワー $P_1$ が、入射したパワー $P_0$ の10分の1となるようにすると共に、1.25mmの伝搬で励起光の90%を吸収させるようにしている。

#### 【0015】

図6(b)のような吸収パターンにするためには、レーザ結晶内の吸収係数を図6(c)のように設定すれば良く、この吸収係数曲線では $z=0$ のところでの吸収係数を $7.5\text{ cm}^{-1}$ となるように設定したが、これは $\text{Nd}^{3+}$ 濃度が0.25原子%の $\text{Nd:YVO}_4$ の波長808nmにおける吸収係数に相当する値であり、この望ましい吸収パターンを実現するためには、図6(c)の曲線に比例して希土類イオン濃度 $C(z)$ が位置 $z$ とともに変化すれば良い。

#### 【0016】

しかしながら、図6(c)に対応する希土類イオン濃度分布を持つレーザ結晶を製造することは、現在の技術レベルでは不可能であるから、現実的には伝搬方向に進むにつれて段階的に濃度を変えていことによってこれを簡易的に実現でき、この場合には個別に製作した希土類イオン濃度の異なるレーザ結晶素子を、濃度の順に並べて相互に張り合わせたり、密着又は近接して配置することによって達成することが可能である。

#### 【0017】

このレーザ結晶素子の配列を図7で説明すると、図7(c)は3種類の希土類イオン濃度の結晶を一体に接合して複合結晶化した場合の濃度パターンの例であり、レーザ結晶の母体結晶は全て $\text{Nd:YVO}_4$ で、 $\text{Nd}^{3+}$ 濃度が励起光入射端から順に0.25原子%、0.5原子%、1.0原子%であると共に、レーザ結晶素子の厚さは励起光入射端から順に、0.9mm、0.5mm、0.3mmであり、3つの濃度に対応する吸収係数は励起光入射端から順に、 $7.5\text{ cm}^{-1}$ 、 $15\text{ cm}^{-1}$ 、 $30\text{ cm}^{-1}$ で、励起光入射側のレーザ結晶の $\text{Nd}^{3+}$ 濃度は、単一結晶を用いた場合でも励起で結晶が破壊しない値に設定した。

#### 【0018】

また、励起光パワー $P(z)$ の位置 $z$ による励起光パワーの変化は図7(b)のようになるが、 $P_1$ は $z=1.7\text{ mm}$ の位置で励起光が吸収されずに通過したパワーであって、この図では入射パワー $P_0$ に対して10分の1となるようにし、複合結晶化によって1.7mmの結晶長があれば、90%の励起光を吸収させられことになり、これらの吸収係数や励起光パワーのパターンに対応する単位長さあたりの吸収パワーは、図7(a)のように変化する。

#### 【0019】

なお、各レーザ結晶素子の厚さを決めるにあたり、第2及び第3の吸収パワーピークが、この $z=0$ の位置における吸収パワーの値を越えないように設定しており、また図7では複数のレーザ結晶素子を密着あるいは接合した場合について説明しているが、結晶の厚さに比べて小さい間隔をあけてレーザ結晶素子を配置しても、ほぼ同様に機能させることができる。また、レーザ結晶素子をより多く使用(4個以上)するとより理想的な濃度分布に近づけることが可能であり、またレーザ結晶素子2個の場合にも効果を発揮することができる。

#### 【0020】

また、図7では $\text{Nd}^{3+}$ 濃度が0.25原子%の $\text{Nd:YVO}_4$ の単一結晶を用いた場合についても、吸収係数や励起パワーの変化及び単位長さあたりの吸収パワーをそれぞれ



示しており、単一結晶の場合には90%の励起光を吸収するために3.2mmの結晶長が必要となるが、 $\text{Nd}^{3+}$ 濃度の異なるレーザ結晶素子を複合化した場合には、1.7mmの結晶長で同じ量の励起光を励起することができる。

#### 【0021】

また、複数の各レーザ結晶素子の発熱はそれぞれの結晶に分散するので、レーザ光が通過する面を除いた側面を金属の金属製のヒートシンクなどによる放熱手段で保持すると、熱伝導によって発熱を放出処理することができるが、この場合における放熱は希土類イオン濃度が高くなっていく方向に対して、直交する外側にレーザ結晶の発熱を放出すると共に、放熱に適合させて励起光吸収分布を励起方向に対して平均化することができる。

#### 【0022】

つぎに、本発明を利用してさらにコストを低く押さえて大量生産をおこなう場合に有効な手段について説明すると、組み合わせるレーザ結晶素子の数は最小限の2個とし、2つのレーザ結晶素子は微少間隔を設けて近接させた状態で配置するが、これらのレーザ結晶素子には励起光に対する吸収係数が大きいので物理的に弱く破壊しやすいが、誘導放出断面積が大きく高効率期待できる $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ を用い、第1及び第2のレーザ結晶素子の $\text{Nd}^{3+}$ 濃度は次のように設定する。

#### 【0023】

第1のレーザ結晶素子は、励起光が最初に入射するので励起で破壊しない濃度に設定する必要がある、出力が40W程度の半導体レーザを使用して直径600 $\mu\text{m}$ 程度に集光して励起する場合には、0.2原子%~0.3原子%であれば破壊せずに $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ の励起が可能であると共に、吸収長が1.1mm~1.7mmで結晶長が問題になる長さではないが、さらに濃度を低くすると十分な励起光吸収を行うために必要な結晶長が長くなり、ビーム品質の良くない半導体レーザで励起すると単位面積あたりの密度が低下するので、 $\text{Nd}^{3+}$ 濃度は0.2原子%~0.3原子%にするのが望ましい。

#### 【0024】

第2レーザ結晶素子は、第1のレーザ結晶素子で吸収しきれなかった励起光を吸収させるために、 $\text{Nd}^{3+}$ 濃度ができるだけ大きな値で且つ、発振効率を下げないような値に設定する必要がある、 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ では $\text{Nd}^{3+}$ 濃度が2~3原子%のものまで入手することが可能であるが、 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ の上準位寿命は $\text{Nd}^{3+}$ 濃度が低い値から1.0~1.1原子%では約90 $\mu\text{s}$ ではほぼ一定で、1.1原子%を越えると上準位寿命が徐々に短くなり、2原子%では50 $\mu\text{s}$ にまで低下して発振効率が低下するので、 $\text{Nd}^{3+}$ 濃度を発振効率の低下がおきない1原子%~1.1原子%以下とするのが望ましい。

#### 【0025】

これらの $\text{Nd}^{3+}$ 濃度の場合における $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 結晶の最適な長さについて図8で説明すると、図8(a)は2つの結晶素子を並べて配置した場合の単位長さ当たりの吸収パワーを、図8(b)は $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ を伝搬中の励起光パワーの位置変化を表し、図8の実線で表した曲線では、第1の結晶素子は $\text{Nd}^{3+}$ 濃度が0.3原子%で厚さを1.5mmとし、第2の結晶素子は $\text{Nd}^{3+}$ 濃度が1.1原子%の場合を示すが、第2の結晶素子の厚さは、励起光が入射した直後の単位長さ当たりの吸収パワーが第1の結晶素子とほぼ等しくなるように設定しており、第1の結晶素子の長さを1.5mmに設定することによって、第2の結晶素子の励起光吸収による結晶破壊を防ぐことが可能であり、この濃度の組合せにおいて励起光の大部分が吸収されるので必要な結晶長を最も短くできる。

#### 【0026】

図8の破線で表した曲線では、第1の結晶素子は $\text{Nd}^{3+}$ 濃度が0.2原子%で厚さを2.9mmとし、第2の結晶素子は $\text{Nd}^{3+}$ 濃度が1.1原子%の場合を示すが、第2の結晶素子の厚さは実線で表した曲線による0.3原子%の場合と同様の条件で設定しており、このように第1のレーザ結晶素子は $\text{Nd}^{3+}$ 濃度が0.2~0.3原子%で厚さは1.5mm~2.9mmとするが、第1のレーザ結晶素子の濃度が0.2~0.3原子%であれば、第2のレーザ結晶素子の結晶厚を1mm以上にしたときに励起光のほぼ100%を吸収できることが図8(b)で明らかであり、第2のレーザ結晶素子の濃度が1.0%

の場合でも同様であるから、第2のレーザ結晶素子の厚さは1mm以上とする。

【0027】

なお、波長1.06 $\mu$ mや1.34 $\mu$ mの発振においては励起光が到達しない部分は、発振に寄与しないだけで発振の妨げにはならず、第2結晶素子の厚さについてはレーザ特性上の上限はなく、組立てが容易で且つコストに大きな影響を与えない長さに設定すればよく、このようにレーザ結晶が2個の場合でも、レーザ結晶の材質を選定して希土類イオン濃度とレーザ結晶の厚さを適切に設定すれば、レーザ結晶が3個以上の場合と同様に本発明の効果が得られ、特にレーザ装置のコストを低減することが可能となる。

【0028】

これらの考察に基づいて本発明では、出力鏡と少なくとも1枚の反射鏡の間でレーザ共振器を構成し、前記レーザ共振器に少なくとも希土類イオンを添加したレーザ結晶を配置し、さらに前記レーザ共振器の外部に配置された半導体レーザと、この半導体レーザの出力光を集光するための励光学系を配置し、前記レーザ共振器の光軸と同軸上に沿って出てくる前記半導体レーザの出力光で前記レーザ結晶を励起する端面励起方式の半導体レーザ励起固体レーザについて改善を行った。

【0029】

本発明の要旨は、前記レーザ結晶として、希土類イオン濃度が異なるだけで同じ組成式をした複数のレーザ結晶素子を、励起光が入射する側から希土類イオン濃度の低い順に並べて配置すると共に、前記レーザ結晶のレーザが通過する面を除く側面に放熱手段を設け、レーザが通過する面と直交する外側へ放熱させたことである。(請求項1)

【0030】

また、請求項1におけるレーザ結晶は各レーザ結晶素子を密着状態で配置した形態(請求項2)、請求項1におけるレーザ結晶は各レーザ結晶素子を一体に接合して複合化結晶にした形態(請求項3)、請求項1におけるレーザ結晶は各レーザ結晶素子を間隔をあけた近接状態で配置すると共に、この間隔は最も厚さの小さいレーザ結晶素子に比べて十分に小さく設定した形態(請求項4)、請求項1～4における放熱手段はレーザ結晶の側面を保持するヒートシンクで構成した形態(請求項5)を採ることができる。

【発明の効果】

【0031】

請求項1の発明による半導体レーザ励起固体レーザでは、個別に製作した希土類イオン濃度の異なる複数の各レーザ結晶素子を、濃度の低い順に並べて配置することによって、レーザ結晶に対する単位長当りのレーザ吸収量を平均化することができると共に、レーザ結晶側面の側面に設けた放熱手段によってレーザが通過する面と直交する外側へ均一に放熱させて冷却できるので、強い励起光に対してもレーザ結晶の破壊が起きず、レーザ出力を増加させることができる。

【0032】

また、各レーザ結晶素子自体は希土類イオン濃度が一定の状態では個別に製作するので、レーザ結晶全体に対して濃度分布を変化させた状態で製作するものに比べて、製作が容易で且つ安価に生産することが可能であり、端面励起の特徴であるアライメント調整が容易である点と相俟って、大量生産に適合する簡便にレーザ出力を増加させる手段として有効である。

【0033】

また、各レーザ結晶素子は請求項2～4の発明のように各種の配置形態を採ることができるが、特に請求項3のように熱融着その他の接合手段で一体に接合して複合化結晶にした場合には、アライメント調整を含む生産及び部品管理など各種の取り扱いが容易になり、請求項2のように密着状態で配置したり、請求項4のように間隔をあけた近接状態で配置した場合には、熱融着その他の接合手段による接合工程がないので安価に製作することが可能になり、請求項5のようにヒートシンクでレーザ結晶の側面を保持する場合には、安価且つ効果的に放熱を行うことができる。

【実施例1】

## 【0034】

本発明の半導体レーザ励起固体レーザについて、本発明を適用した好適な実施形態を示す添付図面に基づいて詳細に説明するが、図1は実施例1による半導体レーザ励起固体レーザであって、励起光源の半導体レーザ1は、波長809nm、連続動作で出力40W、発光領域の寸法が10mm×1μmであり、これを特許文献1と同様の構成をした励起光学系2によって、半導体レーザの出力光を600μm×600μm程度の正方形の形状に集光している。

## 【0035】

レーザ結晶は、第1のレーザ結晶素子5にはNd<sup>3+</sup>濃度が0.25原子%のNd:YVO<sub>4</sub>で、光軸方向の厚さ0.9mmを用い、第1のレーザ結晶素子5の励起光学系2に近い側の面には、Nd:YVO<sub>4</sub>レーザの発振波長1064nmに対して反射率が99%以上で且つ、半導体レーザの波長809nmに対しては反射率が3%以下となる誘電体多層膜反射鏡を設け、第2のレーザ結晶素子6にはNd<sup>3+</sup>濃度が0.5原子%のNd:YVO<sub>4</sub>で、光軸方向の厚さ0.5mmを用い、第3のレーザ結晶素子7にはNd<sup>3+</sup>濃度が1.0原子%のNd:YVO<sub>4</sub>で、光軸方向の厚さ3mmを用いている。

## 【0036】

第3のレーザ結晶素子7の出力鏡4側の面には、Nd:YVO<sub>4</sub>レーザの発振波長1064nmに対して反射率が0.25%以下となるコーティングが施されており、また第3のレーザ結晶素子7は結晶長が少なくとも0.3mmあれば励起光の90%を吸収させられるが、この必要最小限の結晶長より長くすることによって、結晶を複合するための加工時の取扱いを容易にすると共に、半導体レーザの温度変化に起因する波長のずれや、個々の半導体レーザの波長のばらつきなどにも対応できるようにしている。

## 【0037】

また、第1のレーザ結晶素子5と第2のレーザ結晶素子6のそれぞれ向かいあう面と、第2のレーザ結晶素子6と第3のレーザ結晶素子7のそれぞれ向かいあう面は、オプティカルコンタクトをした後に、熱処理を施こして融着によって張り合わせ状態で接合し、この接合によって添加するNd<sup>3+</sup>濃度の異なる3つのNd:YVO<sub>4</sub>結晶を長さ4.4mmの複合化結晶として一体化させている。

## 【0038】

この複合化結晶は、レーザ光や励起光が通過する面以外の面、すなわち側面は銅を主成分とする合金からなるヒートシンク10で保持し、ヒートシンク10と複合化した結晶の間には、密着性を高め熱伝導が良くなるよう厚さ0.1mmのインジウム板を挟んでおり、Nd<sup>3+</sup>濃度の異なる3つのレーザ結晶素子の発熱を熱伝導によって放出して冷却処理しているが、この場合における放熱は希土類イオン濃度が高くなっていく方向に対して直交する垂直な向きに放出する向きを垂直にすると共に、この放熱に適合させて励起光吸収分布を励起方向で一様に近づけるようにしている。

## 【0039】

出力鏡4は、ガラス基板の凹面に誘電体多層膜を施し、Nd:YVO<sub>4</sub>レーザの発振波長1064nmにおいて反射率が90%となるようにすると共に、この出力鏡4と誘電体多層膜反射鏡3の間でレーザ共振器が構成されており、この半導体レーザ励起固体レーザでは、半導体レーザの出力を40Wとしたときに、レーザ結晶を破壊することなく、出力18Wの波長1064nmレーザ出力を得ている。

## 【0040】

なお、各レーザ結晶素子を一体に接合する接合手段としては、熱融着による方法（特に高パワー用）、オプティカルコンタクトによる方法（特に中パワー用）、光学用接着剤によって張り合わせる方法（特に低パワー用）などがあり、必要に応じて所望の接合手段を採ることが可能であり、また一体の複合化結晶にしないで各レーザ結晶素子を単に密着状態で並べる形態を採ることもできる。

## 【実施例2】

## 【0041】

図2は実施例2による半導体レーザ励起固体レーザであって、励起光源の半導体レーザ1と励起光学系2及び出力鏡4は、実施例1の場合と同様の構成であって、また第1のレーザ結晶素子5の寸法と励起光学系の側に設けた誘電体多層膜反射鏡3は、実施例1と同じであるが、反対側の面にはNd:YVO<sub>4</sub>レーザの発振波長1064nmに対して低反射となる誘電体膜が施されている。

【0042】

第2のレーザ結晶素子6は、寸法とNd<sup>3+</sup>濃度が実施例1で使用した第2のレーザ結晶素子6と同じであるが、励起光が入出力する両面側には、Nd:YVO<sub>4</sub>結晶の発振波長1064nmと半導体レーザの波長809nmの両方に対して、低反射となる誘電体膜がそれぞれ施されており、第1のレーザ結晶素子5から約200μmの間隔13をあけて配置してある。

【0043】

第3のレーザ結晶素子7は、寸法とNd<sup>3+</sup>濃度および出力鏡4に近い側の面に施す誘電体膜は実施例1で使用した第3のレーザ結晶素子7と同じであるが、第2のレーザ結晶素子6に近い側の面には、Nd:YVO<sub>4</sub>結晶の発振波長1064nmと半導体レーザの波長809nmの両方に対して、低反射となる誘電体膜がそれぞれ施されており、第2のレーザ結晶素子6から約200μmの間隔13をあけて配置してある。

【0044】

これら3つのレーザ結晶素子は、実施例1の場合と同様にレーザ光や励起光が通過する面以外の面、すなわち側面を銅を主成分とする合金からなるヒートシンク10で保持すると共に、ヒートシンク10と各レーザ結晶素子の間に厚さ0.1mmのインジウム板を挟み、各レーザ結晶素子を側面から冷却している。

【0045】

実施例2の半導体レーザ励起固体レーザの場合には、実施例1のように3つの各レーザ結晶素子を密着させたり、熱融着などの接合手段で一体化して複合化結晶としてはいいないが、レーザ結晶素子の長さ比べて短い間隔13をあけて配置することによって、実施例1の場合と同様に半導体レーザの出力を40Wにしてもレーザ結晶を破壊することがなく、波長1064nmレーザ出力光が18Wのパワーで得られている。

【実施例3】

【0046】

図3は実施例3による半導体レーザ励起固体レーザであるが、この実施例ではNd:YVO<sub>4</sub>結晶による第1及び第2の2つのレーザ結晶素子11, 12を用い、第1のレーザ結晶素子11の励起光学系2に近い側の面に誘電体多層膜反射鏡3を設けると共に、間隔13をあけて第1のレーザ結晶素子11と第2のレーザ結晶素子12を配置した。

【0047】

第1のレーザ結晶素子11は、Nd<sup>3+</sup>濃度が0.2原子%で厚さは1.5mmとして、励起光学系の側には誘電体多層膜反射鏡3を施すと共に、反対側の面にはNd:YVO<sub>4</sub>レーザの発振波長1064nmおよび励起光の波長808nmに対して低反射となる誘電体膜が施し、第2のレーザ結晶素子12は、Nd<sup>3+</sup>濃度が1.1原子%で厚さは3.5mmとし、励起光と発振光が入出力する2面にはNd:YVO<sub>4</sub>レーザの発振波長1064nmおよび励起光の波長808nmに対して低反射となる誘電体膜を施す。

【0048】

第1のレーザ結晶素子11と第2のレーザ結晶素子12は、長さが約200μmの間隔13を設けて配置し、各レーザ結晶素子11, 12はレーザ光や励起光が通過する面以外の面すなわち側面を、銅を主成分とする合金からなるヒートシンク10で保持することによって冷却しているが、ヒートシンク10との密着性を高めて熱伝導が良くなるように、厚さ0.1mmのインジウム板を挟んでいる。

【0049】

この実施例3の半導体レーザ励起固体レーザは、実施例1又は2の場合と同様に半導体レーザの出力を40Wにしてもレーザ結晶を破壊することなく、また波長1064nmレ

ーザ出力光は、レーザ結晶を3個使用している実施例1又は2のレーザ装置にはほぼ匹敵する17Wのパワーで得られており、安価で且つ量産性の点で優れている。

#### 【実施例4】

##### 【0050】

図4は実施例4による半導体レーザ励起固体レーザであるが、この実施例では出力鏡4と非線形光学結晶8を除く構成要素は実施例1と全く同じものを使用しており、非線形光学結晶8の材質はチタン酸リン酸カリウム  $\text{KTiOPO}_4$  で、そのカット方位は発振波長1064nmのレーザ光の第2高調波を発生させるために、 $\theta = 90^\circ$ 、 $\phi = 24^\circ$ となっている。

##### 【0051】

出力鏡4は、この実施例ではNd:YVO<sub>4</sub>の発振波長に対して99%以上の反射率を持ち、また第2高調波の波長532nmに対しては反射率が3%以下となる誘電体多層膜がガラス基板の凹面に施されており、この実施例4による半導体レーザ励起固体レーザでは、半導体レーザの出力を40Wとしたときに、最大11Wの波長532nmレーザ光が得られている。

##### 【0052】

なお、この実施例では非線形光学結晶としてKTPを使用しているが、ニオブ酸カリウム  $\text{KNbO}_3$ 、 $\beta$ -ホウ酸カリウム  $\text{BaB}_2\text{O}_4$  ( $\beta$ -BBO)、三ホウ酸リチウム  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  などのレーザ発振波長の第2高調波を発生させることのできる非線形光学結晶を使用したり、KTPやニオブ酸リチウム  $\text{LiNbO}_3$  或いはタンタル酸リチウム  $\text{LiTaO}_3$  などを分極反転構造にした素子を利用してもよい。

#### 【実施例5】

##### 【0053】

図5は実施例5による半導体レーザ励起固体レーザであるが、この実施例では音響光学効果を利用したQスイッチ9がレーザ共振器に内に配置されており、それ以外の構成要素は実施例1と全く同じものを使用しており、Qスイッチ9には外部からオン・オフ変調する高周波電力が供給されている。

##### 【0054】

この実施例4による半導体レーザ励起固体レーザででは、高周波電力がオフのときにレーザパルスが発生し、高周波レーザのオン／オフを20kHzの周波数でおこない、これに対応して繰り返しレーザパルスが発生するが、半導体レーザ出力が40Wのとき、16Wの時間平均パワーが得られた。

##### 【0055】

なお、この実施例は音響光学効果を利用したQスイッチによってパルス発振を行うレーザであるが、Qスイッチ素子として電気光学効果を利用するものなど、他の能動素子を用いることも可能であり、またCr<sup>4+</sup>:YAGなどの過飽和吸収体や半導体材料で製造した半導体可飽和吸収反射鏡 (Semiconductor Saturable Absorption Mirror) などの受動Qスイッチ素子を使用したものでもよい。

##### 【0056】

以上のように、レーザ結晶として実施例1, 2, 4, 5では3個の実施例3では2個のNd<sup>3+</sup>濃度の異なるNd:YVO<sub>4</sub>結晶を使用し、濃度と結晶長を適切に設定することによって、励起光の単位長さあたりの吸収量を平均化しているが、4個以上のレーザ結晶素子を使用して吸収量をより平均化することによって、励起光の総量をさらに上げたり、あるいは励起光の集光径をより小さくすることができ、半導体レーザ励起固体レーザの出力をさらに増加させることが可能となる。

##### 【0057】

また、以上の実施例では誘電体多層膜反射鏡3や出力鏡4で高反射とする波長や、レーザ結晶に施した低反射膜の低反射となる波長を、1064nmとすることによって半導体レーザ励起固体レーザを1064nmで発振させているが、この反射や透過の波長特性を他の波長に対して適切に設定することによって、例えば1340nmなど他の波長

で発振させることも可能である。

【0058】

また、以上の実施例では希土類イオンを添加する媒質として  $YVO_4$  をレーザ結晶に使用しているが、 $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG)、 $LiYF_4$  (YLF)、 $GdVO_4$  など、半導体レーザによる励起が可能で、添加する希土類イオンの異なるものを製造できるレーザ結晶であれば使用が可能であると共に、結晶性の媒質に限らず、ガラスや多結晶などの半導体レーザによる励起が可能で、添加する希土類イオン濃度が異なるものを製造できる媒質であればよい。

【0059】

また、以上の実施例ではレーザ共振器を構成する反射鏡として、第1のレーザ結晶素子に付けた誘電体多層膜反射鏡3を使用しているが、これと同様の反射・透過特性をもつ独立の反射鏡を、第1のレーザ結晶素子5と励起光学系2の間に配置した構造のレーザでも同様の効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0060】

【図1】 本発明の実施例1による半導体レーザ励起固体レーザの構成図である。

【図2】 本発明の実施例2による半導体レーザ励起固体レーザの構成図である。

【図3】 本発明の実施例3による半導体レーザ励起固体レーザの構成図である。

【図4】 本発明の実施例4による半導体レーザ励起固体レーザの構成図である。

【図5】 本発明の実施例5による半導体レーザ励起固体レーザの構成図である。

【図6】 本発明による半導体レーザ励起固体レーザの作用説明図である。

【図7】 本発明による半導体レーザ励起固体レーザの作用説明図である。

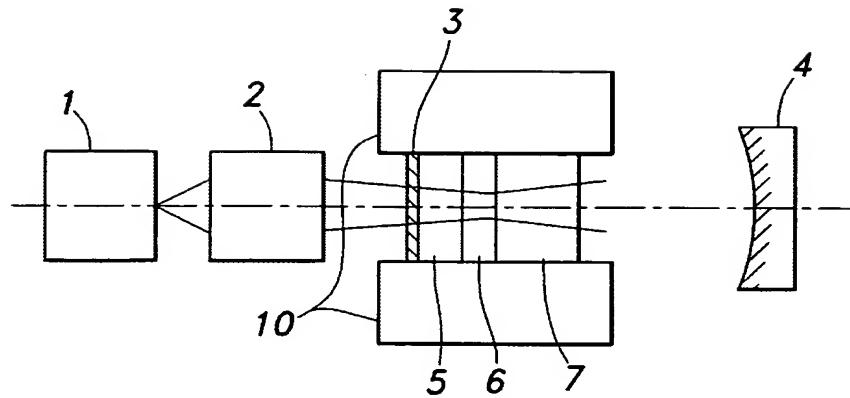
【図8】 本発明による半導体レーザ励起固体レーザの作用説明図である。

【符号の説明】

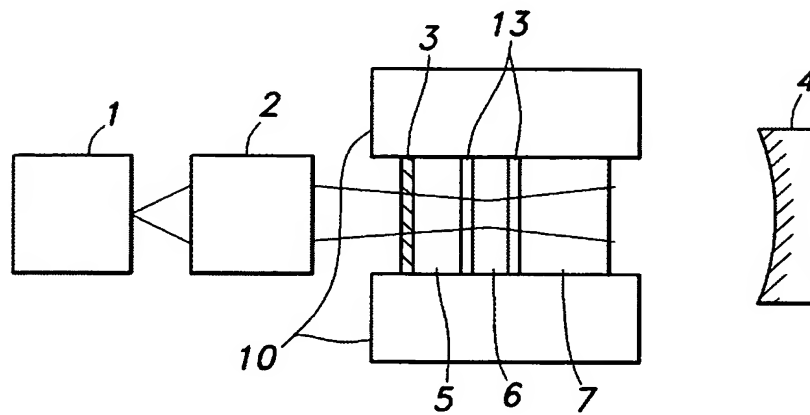
【0061】

- 1 半導体レーザ
- 2 励起光学系
- 3 誘電体多層膜反射鏡
- 4 出力鏡
- 5, 11 第1のレーザ結晶素子
- 6, 12 第2のレーザ結晶素子
- 7 第3のレーザ結晶素子
- 8 非線形光学結晶
- 9 Qスイッチ
- 10 ヒートシンク
- 13 間隔

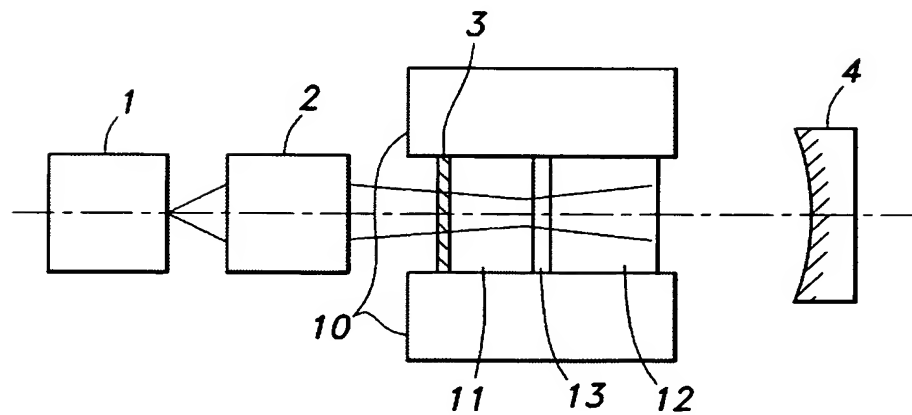
【書類名】 図面  
【図 1】



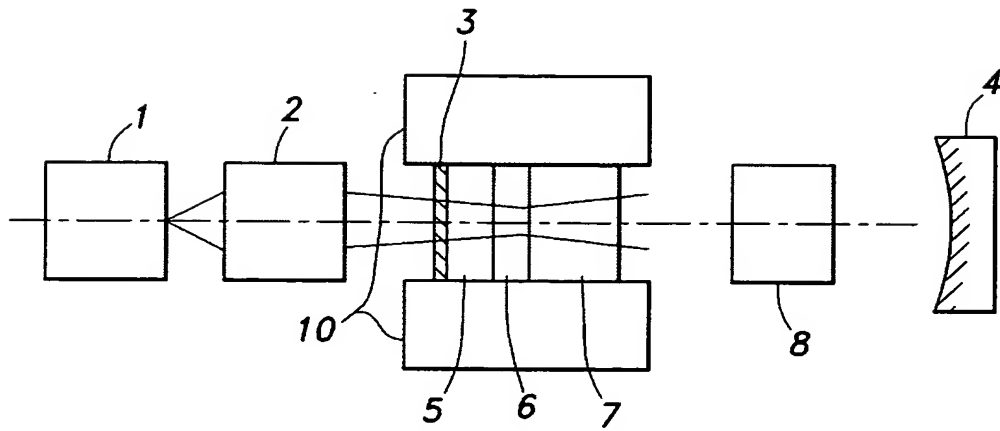
【図 2】



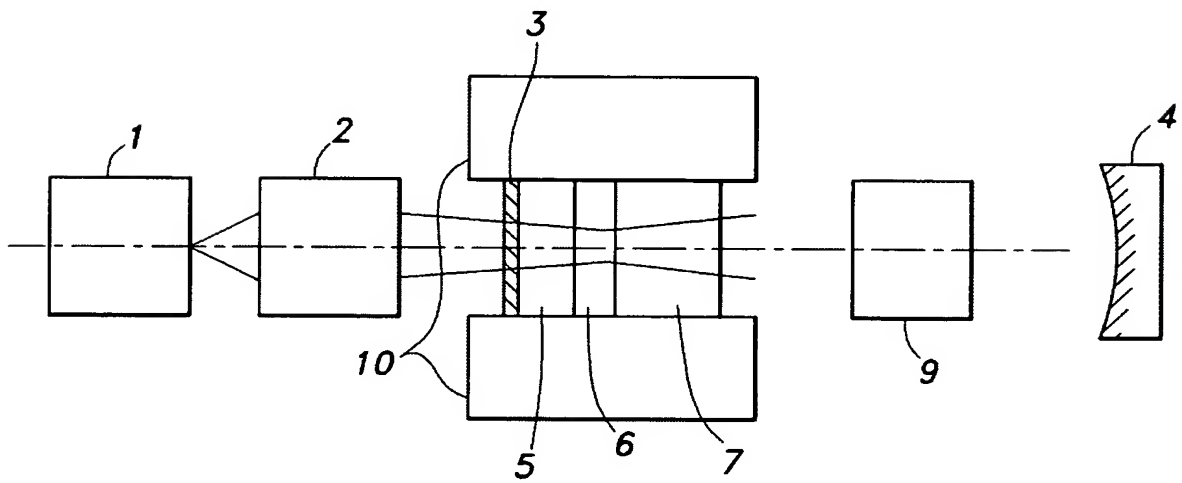
【図 3】



【図 4】

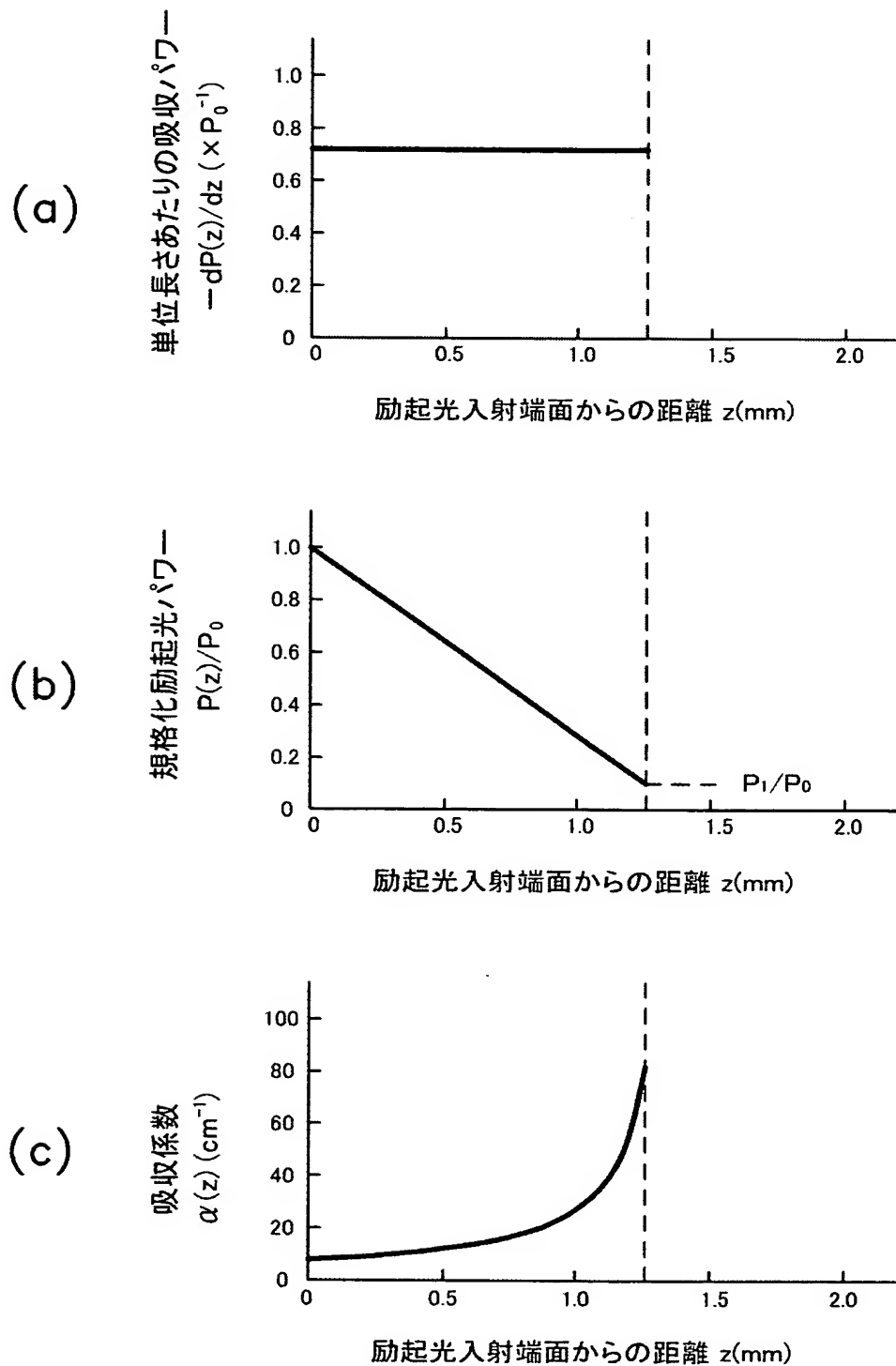


【図 5】

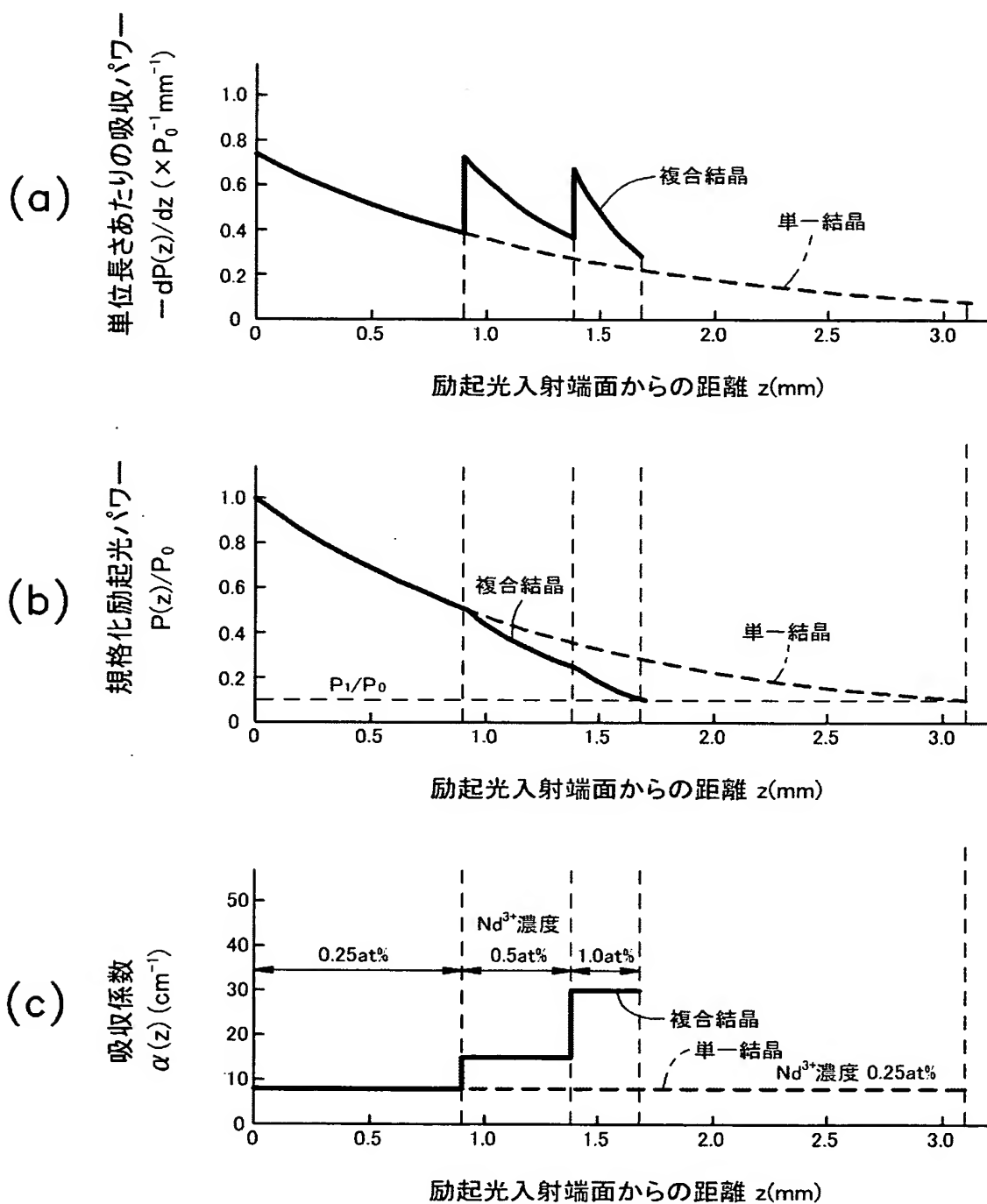




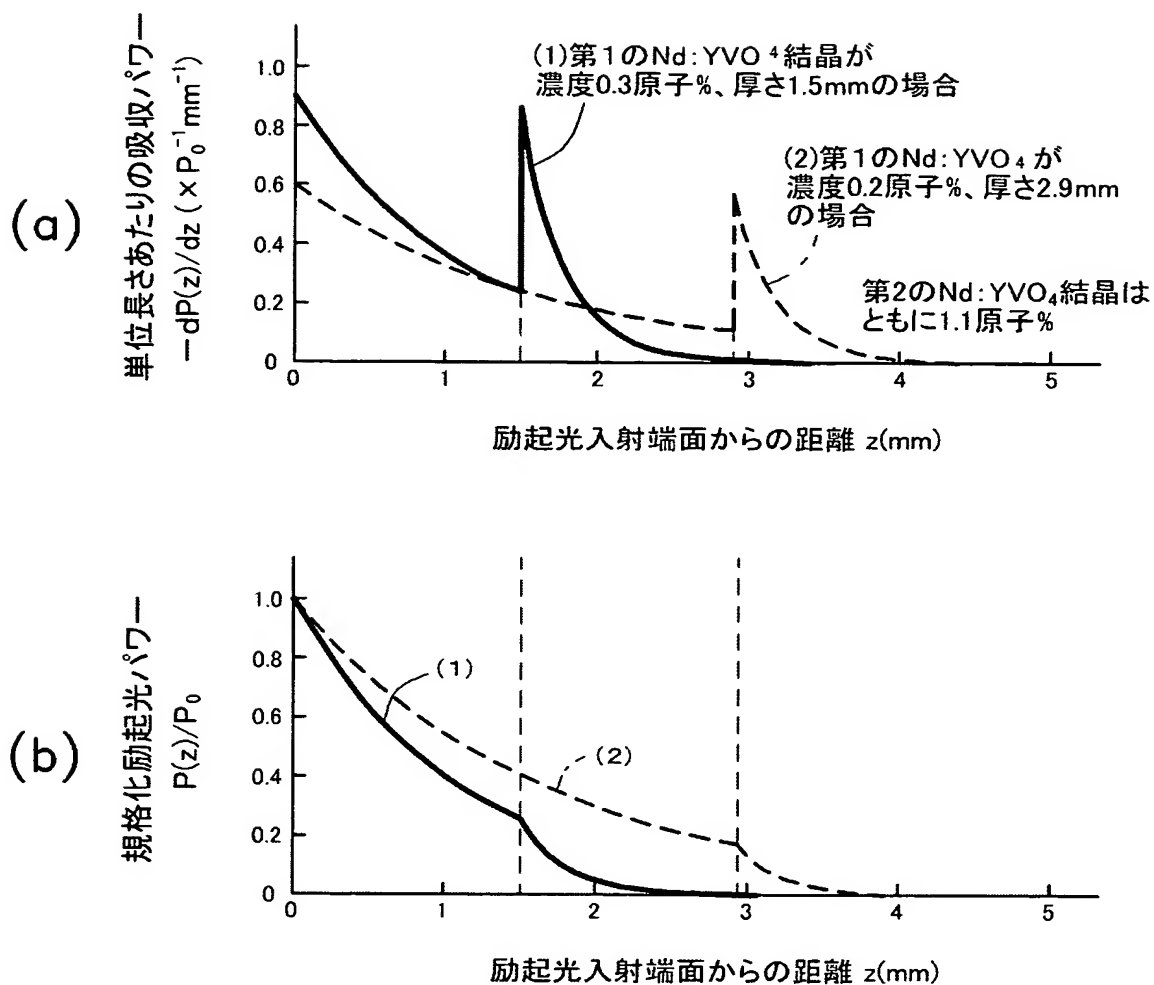
【図 6】



【図 7】



【図 8】



**【書類名】 要約書****【要約】****【課題】**

端面励起方式の半導体レーザ励起固体レーザにおいて、励起光の増大に伴うレーザ結晶の破損を防止してレーザ出力を増大させる半導体レーザ励起固体レーザを提供する。

**【解決手段】**

端面励起方式の半導体レーザ励起固体レーザにおいて、レーザ結晶として、希土類イオン濃度が異なるだけで同じ組成式をした複数のレーザ結晶素子 5, 6, 7 を、励起光が入射する側から希土類イオン濃度の低い順に並べて配置すると共に、レーザ結晶のレーザが通過する面を除く側面に放熱手段 10 を設け、レーザが通過する面と直交する外側へ放熱させることによって、レーザ結晶に対する単位長当りのレーザ吸収量を平均化し且つレーザ結晶を冷却させるようにした。

**【選択図】 図 1**

特願 2 0 0 3 - 3 2 3 8 4 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[ 5 9 2 1 6 3 7 3 4 ]

1. 変更年月日

1 9 9 4 年 1 0 月 2 6 日

[変更理由]

名称変更

住 所

東京都世田谷区新町 3 - 5 - 3

氏 名

昭和オプトロニクス株式会社